

HL-1 托卡马克中的氢再循环

彭利林 徐光碧 袁成杰 曹曾 黄克强 张述勋 严东海

核工业西南物理研究院, 成都, 610041

1991年4月15日收到

本文从粒子平衡方程出发, 运用 Howe 的氢再循环模型, 借助于设置在不同位置并经绝对校准的 H 探测器测得的信号强度等实验数据, 研究了 HL-1 托卡马克放电中总体再循环系数随时间变化. 并采用 Ehrenberg 定义的加料效率的概念来分析在不同壁和孔栏条件或各种工作气体情况下的壁抽吸和壁加料现象. 用四极质谱仪观察并比较了不同等离子体放电后的粒子释放情况, 较系统地研究了 HL-1 装置不同运行条件下的再循环现象及其对粒子约束特性的影响.

PACC: 5240H; 5255

一、引言

再循环是托卡马克中等离子体与器壁和孔栏材料表面相互作用时燃料气体从材料表面释放回到等离子体中的过程. 它在讨论等离子体粒子平衡、能量平衡和有关材料的表面特性的研究中起着重要作用. 国际上 JET, TFTR, DIII-D, TEXTOR 等托卡马克装置都是根据各个装置不同的特点研究过再循环的情况^[1-4], 国内也有一些工作提及 HL-1 装置再循环的问题^[5-7]. 但是, 由于再循环是许多相关现象的总括, 它不仅与具体材料特性有关, 而且受等离子体中粒子输运和刮离层中的条件的影响. 所以, 不同装置或同一装置不同条件下再循环的特性也不一样. 本文旨在对 HL-1 托卡马克中各种不同条件下的再循环现象进行较为定量的系统的观测和研究, 为进一步实现再循环控制提供依据.

二、再循环模型

粒子平衡方程通常写成如下形式:

$$\frac{dN_e}{dt} = -\frac{N_e}{\tau_p} + R(t)\frac{N_e}{\tau_p} + \phi_g, \quad (1)$$

式中 N_e ——等离子体粒子(电子)总数; τ_p ——粒子约束时间; ϕ_g ——外部送气来的粒子源速率; $R(t)$ ——总体再循环系数, 它是随时间变化的量. 定义密度衰减特征常数

$$\tau_e^* = \frac{N_e(t_0)}{\phi_g(t_0) - \frac{dN_e(t_0)}{dt}}. \quad (2)$$

它满足

$$\tau_0^* = \tau_p / (1 - R), \quad (3)$$

式中 τ_0 ——密度初始下降时刻。

Howe 的模型^[6]把再循环的粒子通量分为从壁来的(Γ_w)和从孔栏来的(Γ_L)两部分。离开等离子体的离子通量 Γ^+ 横向扩散到刮离层, 流到孔栏和器壁, 然后被中性化。从孔栏和送气口来的冷中性通量与等离子体的离子电荷交换产生热中性通量流到壁, 然后从壁反射, 或在壁中扩散回到表面, 解吸后再循环回到等离子体中。图 1 给出氢再循环示意图。

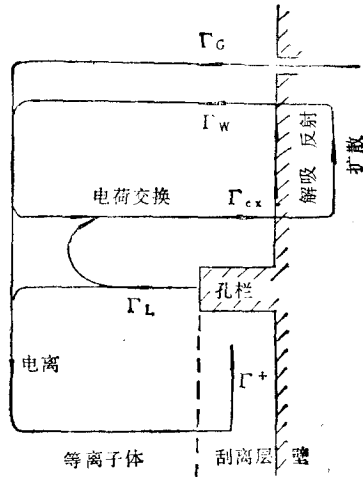


图 1 氢通量及其循环途径示意图

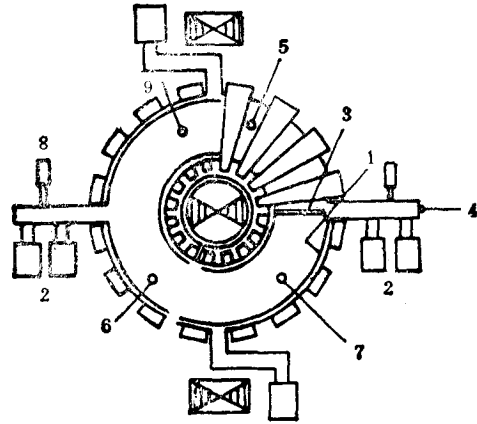


图 2 HL-1 上与氢再循环有关的实验安排

1——真空室; 2——涡轮分子泵; 3——可移动石墨孔栏; 4——多道 H_0 探测器; 5——东北边送气口; 6——西南边送气口, 单道 H_0 探测器; 7——朗缪尔探针, HCN 激光干涉仪; 8——四极质谱仪; 9——热电偶

三、再循环系数

HL-1 为中型托卡马克, 真空室为不锈钢(GH39)波纹管, 大半径为 102cm, 小半径为 20cm, $B_T = 2T$, $I_p = 120kA$, $n_0 = (1-5) \times 10^{13}cm^{-3}$, $T_e = 300-800eV$, 边缘等离子体温度为 10—30eV。大环南北方向各有一个固定的跑道形钨孔栏, 东边有一个可移动的石墨孔栏。真空抽气系统由四个有效抽速为 700l/s 的涡轮分子泵组成。送气口有两个, 其中西南边送气口与单道 H_0 探测器共用一个窗口。多道 H_0 探测器设在活动孔栏附近, 其它有关诊断的设置如图 2 所示。

从粒子平衡方程出发, 可以得到总体再循环系数的表达式^[9]为

$$R = \frac{\phi_0}{\phi_0 + \phi_g - \frac{dN_0}{dt}} \quad (4)$$

基于上述模型, 总再循环粒子源速率 ϕ_0 用经过绝对校准的设在不同位置的 H_0 探测器

测得; ϕ_g 由程序控制脉冲送气, 经实验室再校准后得到; N 由 HCN 激光干涉仪测得。由此可估算出再循环系数。图 3 为一次常规放电期间再循环系数随时间的变化。具有金属壁的 HL-1 托卡马克, 再循环系数小 ($R \lesssim 1$)。在 $B_T = 2T$, $I_p = 120kA$, $a = 18cm$ 情况下, 放电初期, 再循环系数很小 ($R \sim 0.5$), 随着电流上升, 气体迅速电离, 密度很快增加, 再循环加剧; 电流进入平顶后, 再循环系数在 0.8—0.9 之间平缓浮动; 外部送气停止后, 密度几乎立即下降, 再循环系数也减小 (0.6—0.8); 尔后, 密度衰减速率减小, H_α 辐射大大增强, 再循环系数维持在略小于 1 不变。

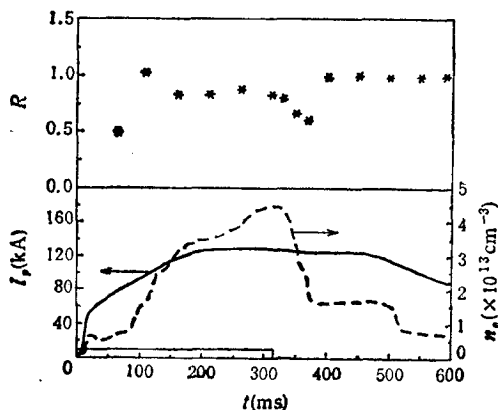


图 3 再循环系数随时间的变化 *——所测的再循环系数数据点; ——等离子体电流波形; ---- 电子密度随时间变化; 矩形——补充送气时间。

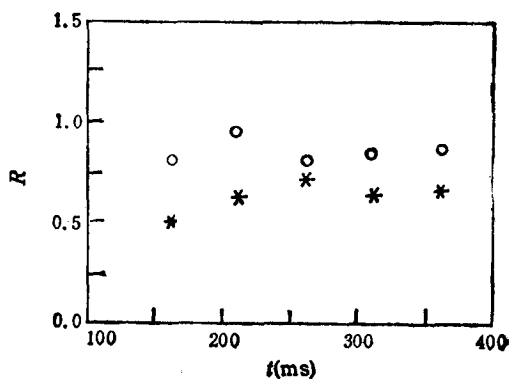


图 4 不同壁温下再循环系数的比较 *—— $T_w = 160^\circ C$; o—— $T_w = 90^\circ C$

四、再循环与壁条件

1. 壁温效应

HL-1 装置通常运行在壁温 80—170°C 之间, 温度不同时, 壁吸附氢的能力也不同, 因而再循环的大小也会发生变化。图 4 为放电条件相同而壁温不同的两次放电, 在电流坪区再循环系数的比较。壁温高时, 再循环系数较小。这是因为氢在不锈钢中有一个低温出气峰。用均匀速率加热预充氢试样, 得到氢在不锈钢中的热解吸曲线如图 5 所示。HL-1 壁温较高时, 接近或处于低温出气峰, 这时的壁条件较为干净。如果壁温能提高和保持在 160°C 以上, 对获得稳定可控的放电是有利的。

2. 预放电清洗效应

充 H_2 的低功率放电可以清除不锈钢上的轻杂质, 实现低 Z_{eff} 等离子体放电。HL-1 装置用 TDC, PDC, AC(50Hz)-DC 等常规手段获得托卡马克放电要求的初始壁条件。文献 [7] 中比较了不干净放电和经放电清洗后放电的密度波形和 H_α 线辐射信号强度的变化, 表明放电清洗可以降低器壁的氢再循环。

为了更定量地说明混合气体放电清洗对再循环的影响, 这里引用一个较粗略而有用的物理量。Ehrenberg^[1] 定义加料效率 F 为放电中 t 时刻的等离子体总电子数与直到 t 时

刻的外部送入的电子总数 N_{in} 之比。

$$F = N_c / N_{in}. \quad (5)$$

它表征等离子体放电中壁和孔栏对粒子的摄取能力。

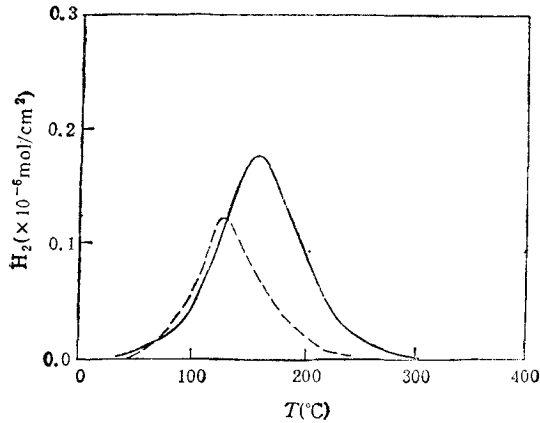


图5 不锈钢中氢释放与温度的关系 ——升温速度 $5.4^\circ\text{C}/\text{min}$ -----升温速度 $3.1^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

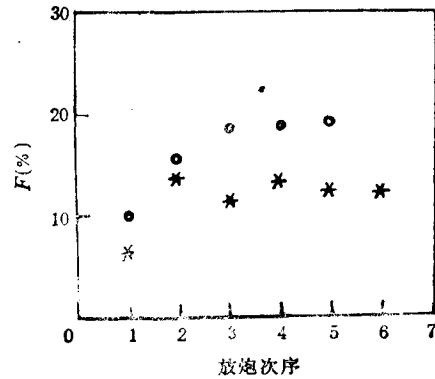


图6 不同预放电清洗条件下加料效率随欧姆放电次数的变化。O——充纯 H_2 放电清洗; *——充混合气体 ($\text{H}_2 + \text{Kr}$) 放电清洗

实验观察了不同混合气体 ($\text{H}_2 + \text{Ne}$, $\text{H}_2 + \text{Kr}$, $\text{H}_2 + \text{Xe}$) 放电清洗对再循环的影响。通过晚上 3h, 早上 1h 充混合气体 ($\text{H}_2 + \text{Kr}$) 交流放电清洗后, 开头几炮准稳态放电时, 加料效率随放电次数的变化如图 6 所示。加料效率开始很低, 然后逐步提高, 趋于饱和。和充 H_2 放电清洗相比, 加料效率更低。表明氩使壁中的氢和轻杂质较充分排空, 加强了壁的抽吸能力, 也说明掺氩放电清洗可以提高放电清洗效率, 获得更为干净的壁条件, 使装置工作在低再循环状态。

3. 蒸镀钛壁改性

等离子体轰击钛棒或钛球使其溅射喷镀在器壁上, 钛膜在常温或较高温度下与活性气体钛形成钛的氧化物和钛的氢化物, 降低杂质水平, 并抑制氢的再循环。为了保持密度不变, 钛吸气后放电注入气体总量必须是非钛吸气放电的 2.5 倍左右^[6]。

但是, 由于钛膜对氢的吸气过程是可逆的, 而对氧的吸附却形成稳定的一氧化钛, 吸气过程不可逆。而且氢、氧、氮、一氧化碳在新鲜钛膜上的粘附几率分别为 0.06, 0.8, 0.3, 0.7^[10], 所以, 吸氢钛膜表面易被激活而吸附氧和其它杂质。蒸钛后立即送进大量氢气, 使器壁上的钛膜对 H_2 趋于饱和图 7 表明, 在放电条件和补充送气相同的情况下, 蒸钛前密度大, H_α 辐射弱, 环电压高; 蒸钛后则反之。此时, 钛膜主要是对轻杂质的吸附和屏蔽引起电子密度的减少, 而吸氢饱和和钛膜的存在, 实际上成了内部加料源, 使氢再循环增加。正如图 7 所示, a, b 两炮放电参数和送气情况均相同, 但 $n_e(a)$ 在 340ms 处以 $\tau_p^* = 190$ ms 的衰减常数开始下降时, $n_e(b)$ 并不下降, 而是维持平顶一段时间, 在晚得多的时刻 (384ms) 才以比前者大的衰减常数 ($\tau_p^* = 250$ ms) 下降。可惜蒸镀钛的效果不能维持很久, c 为蒸镀钛后第二炮, 粒子约束特性和杂质水平介于 a 和 b 之间, 从变化趋势看, 几炮后将恢复到蒸镀钛前的水平。

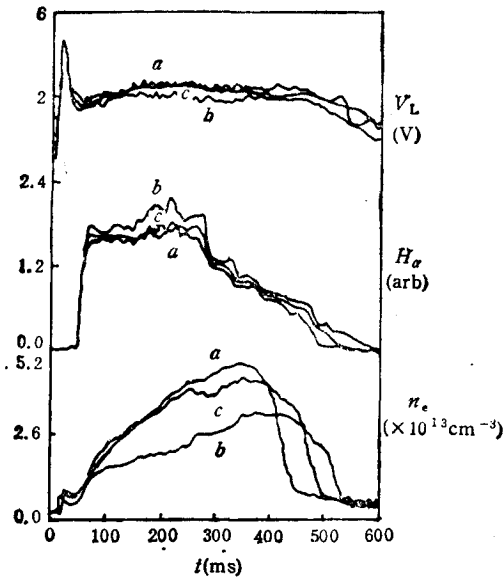


图7 蒸镀钛前后电子密度 n_e 、 H_α 辐射和环电压 V_L 随时间 t 变化的比较 a ——蒸镀钛前; b ——蒸镀钛后第一炮; c ——蒸镀钛后第二炮

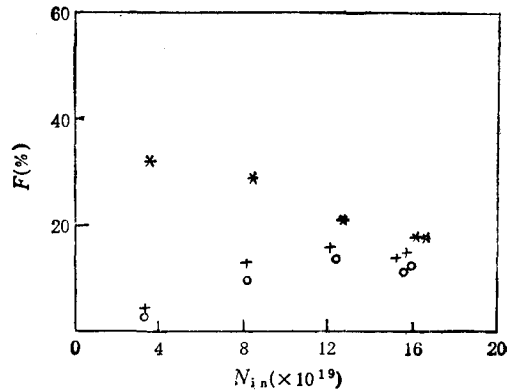


图8 掺氮欧姆放电前后充氢放电加料效率的变化 *——掺氮放电前;O——掺氮放电后第二炮;+——掺氮放电后第三炮

4. 掺惰性气体放电壁改性

在工作气体中掺进极少量的氮可很容易使放电破裂,难于获得掺氮的稳定放电,但这少量的氮却明显使壁改性。图8比较了掺氮欧姆放电前后几次充 H_2 放电中加料效率的变化。与第四节的结果相似,氮有助于壁中的氢解吸,增加了紧接着的充氢放电中壁和孔栏的抽吸能力,减小再循环。再比较掺氮放电后第二炮和第三炮的情况,还可看出,这种影响随充 H_2 放电次数增加而逐渐减弱。另外,由于初始壁条件不同,加料效率作为输入电子数的函数,在掺氮放电前,随 N_{i0} 增加而减小,掺氮放电后,却随 N_{i0} 增加而增大,二者逐渐趋向 HL-1 加料效率的平衡值($\sim 20\%$)。

在充 H_2 放电期间喷进少量的氮气,等离子体行为的变化是很有趣的。起初,氮原子的出现并没有使电子密度增加,却使氢原子和碳离子特征谱线辐射增强, Z_{eff} 增加;伴随着 H_α 辐射峰的出现, n_e 迅速上升;而直至放电后期,氮原子仍大量积聚在边缘区域(图9)。表明密度峰的出现,主要不是由于氮的直接电离引起的,而是因为大部氮原子被等离子体离子弹性散射打到壁上,增加了氢解吸和轻杂质溅射产额,加剧再循环,使密度增加。

在充 H_2 放电中,几乎是脉冲送气-停止,密度立即下降,哪怕是在电流平顶期间停气[图10(a)].而在本底充 H_2 , 补充喷氮的放电中则不然,停止喷氮后,密度继续上升,44ms后才下降[图10(b)],而且密度衰减常数约为充 H_2 放电的3倍。

总而言之,掺惰性气体放电能使壁改性,主要特点是诱发壁和孔栏中的氢解吸。氮起到双重作用,它既直接参加电离,贡献电子,又能增加氢再循环,所以,为了达到同样的密度,氮的送气量大约仅为 H_2 的五分之一。

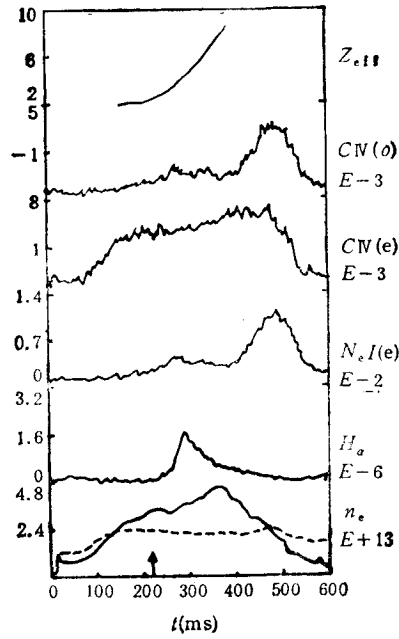


图9 掺氘放电等离子体行为随时间变化
 ↑—喷氘脉冲;虚线——电流波形;(e)——等离子体边缘;(o)——等离子体中心

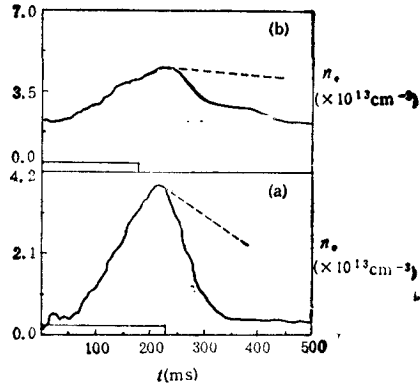


图10 停止补充喷气后密度行为的比较
 (a)——补充喷 H₂ 放电, $t_{\text{喷}}^{\text{喷}} \approx 170 \text{ms}$; (b)——补充喷氘放电, $t_{\text{喷}}^{\text{喷}} \approx 510 \text{ms}$; 矩形为补充喷气时间

五、再循环与孔栏条件

由于孔栏半径的大小限制了等离子体的位置和尺寸,也就限制了刮离层的厚度。用

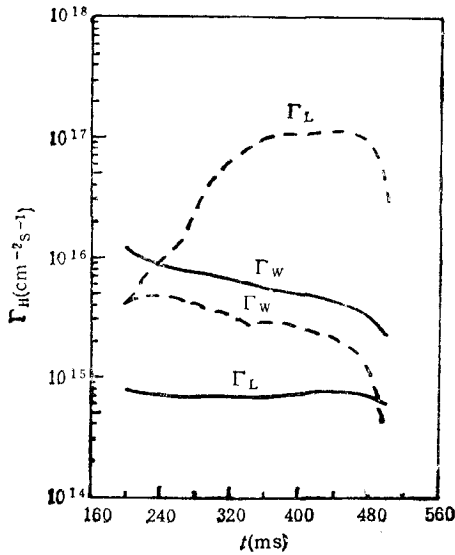


图11 不同孔栏半径时氢通量的比较 实线—— $a = 20 \text{cm}$;虚线—— $a = 18 \text{cm}$

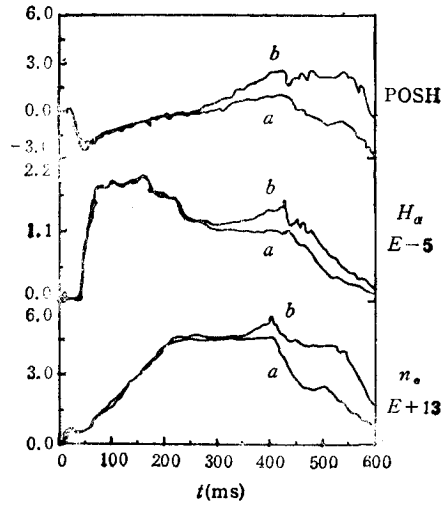


图12 等离子体位移对再循环的影响 a——等离子体处于平衡位置;b——等离子体在270ms后向外移动

在孔栏附近和远离孔栏处测得的 H_α 辐射强度算出在不同半径时,孔栏和壁的氢通量 Γ_H 比较曲线示于图 11. 当孔栏半径 a 较小时,由于等离子体距壁较远,等离子体与壁的相互作用减弱,而跟孔栏的相互作用大大加强.

等离子体位置对再循环的影响,还可以用下面的例子来证明. 在位移平衡反馈控制实验中,特意在放电 225ms 处加一个 1V/360ms 脉冲的扰动. 大约在 45ms 后水平位移开始响应,等离子体在水平方向向外移动(图 12). Rowan^[11]认为,再循环粒子源的极向因子主要取决于主再循环区,对等离子体位置敏感,主再循环区在等离子体大环半径外侧. 图 11 表明,在放电条件和送气量相同情况下,等离子体向外移动时,再循环增加,边缘 H_α 辐射增强,电子密度也随之增加.

至于孔栏材料的影响,在钛球点孔栏放电实验中,也观察到类似第四节所述的现象,而且更为显著. 石墨孔栏时, τ_p^* 约为 170ms,而钛球点孔栏放电, τ_p^* 高达 540ms.

六、不同放电对再循环的后效应

由于壁温低,壁吸附的气体多,所以等离子体放电后的出气现象严重. 除了被电离的

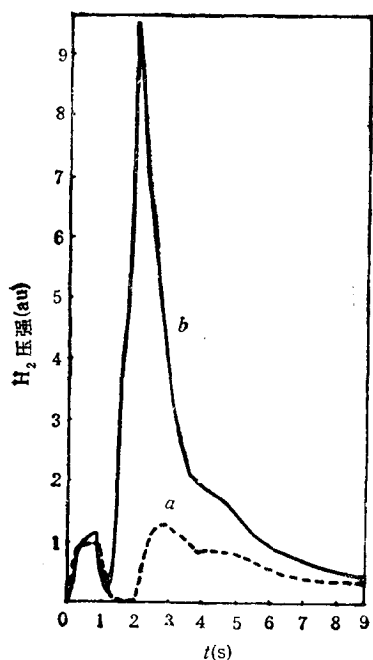


图 13 两次不同放电后 H_2 气压变化比较
a——电流软着陆放电; b——破裂放电

气体百分之百的复合外,壁的热解吸也放出相当可观的量. 放出的气体又大量被壁重新吸附. 在电流软着陆的情况下,前者约为 120%,后者约为 40%. 在破裂放电情况下,更严重得多. 小破裂时,出气约为 200—300%;大破裂时,高达 800%;即使是电流“软着陆”,^[11]但出现 MHD 不稳定性时,也会在 300—500%之间.

图 13 比较用四极质谱仪在不同放电情况下测得的 H_2 气压变化. 这意味着粒子释放与放电情况密切相关. 破裂放电增加了壁上的功率沉积,使壁中的氢大量热解吸. 而大量的粒子释放,使壁载氢减少,又增加了壁的抽吸能力,所以,破裂放电后的壁吸附也大大增加(70—90%). 但相对来说,被真空泵抽走的气体仍然比稳定放电时多,壁负载还是减少了,这将引起下一次放电时再循环的变化.

总之,等离子体放电结束后,仍有大量的气体留在装置内,贮留的多寡取决于放电情况. 这些被扣留的气体将在后来的放电中等离子体和壁之间的粒子交换起作用.

七、结 论

1. 在等离子体和器壁、孔栏材料表面之间,有一个燃料粒子的连续交换过程. 这个粒

子交换过程是等离子体引起的。在有无等离子体的情况下,粒子有不同的释放时间常数。在 HL-1 常规放电情况下,粒子替换时间约为 40—60ms,再循环系数在 0.8—0.9 之间。

2. HL-1 装置的加料率很低,在稳定放电情况下,输入气体的一个可观份额($\geq 70\%$)留在壁和孔栏内与等离子体交换粒子。

3. 提高壁温、掺惰性气体放电清洗、蒸镀钛等,可以改善壁条件,减小再循环。对充喷氢的欧姆放电进行了初步实验,与充 H_2 放电比较,为获得相同的密度,送气量减少为 1/5,而密度衰减特征时间却延长 3 倍。与密度反馈控制程序送气配合,可望获得密度高而约束性能又好的等离子体。应进一步做充氮和充 D_2 的实验。

4. 在流动的 H_2/CH_4 中用射频 GDC 放电的方法,对金属壁进行碳化处理,是国际上流行的改善第一壁条件的技术,对控制和减少杂质水平,减少辐射损失,改善再循环,改善能量约束都有显著作用,建议开展这项实验。

感谢环流部装置运行全体同志提供良好的实验条件;感谢邓中朝提供密度数据、罗俊林提供轻杂质辐射数据、袁宝山提供等离子体位移数据、杨式坤提供边缘等离子体温度数据、黄秋荣、邓柏权允许引用不锈钢中氢释放实验曲线。本工作还得到胡高、肖正贵、刁光耀、张映林等的支持,一并致谢。

- [1] J. Ehrenberg, *J. Nucl. Mater.*, 162--164(1989),63.
- [2] M. Shimada *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, 145--147(1987),544.
- [3] S. Allen *et al.*, GA-A19292(1988).
- [4] J. Winter, *J. Vac. Sci. Technol.*, A5(1987), 2286.
- [5] 朱毓坤等,核聚变与等离子体物理,8(2)(1988),65.
- [6] 郑永真等,核聚变与等离子体物理,8(4)(1988),215.
- [7] 郑永真等,核聚变与等离子体物理,9(2)(1989),91.
- [8] H. C. Howe, *J. Nucl. Mater.*, 93--94(1980),17.
- [9] T. Uckan, OKNL/TM-10698(1988).
- [10] 王欲知,真空技术,四川人民出版社,(1980),第 120 页.
- [11] W. L. Rowan *et al.*, *J. Nucl. Mater.*, 145--147(1987), 562.

HYDROGEN RECYCLING IN HL-1 TOKAMAK

PENG LI-LIN XU GUANG-BI YUAN CHENG-JIE CAO ZENG

HUANG KE-QIANG ZHANG SHU-XUN YAN DONG-HAI

Southwestern Institute of Physics, Chengdu, 610041

(Received 15 April 1991)

ABSTRACT

The recycling behaviours and their effects on the particle confinement under various operational conditions in HL-1 device are studied systematically. Using the particle balance equation and a hydrogen recycling model proposed by Howe, we estimated the global recycling coefficient $R(t)$ from the data of H_α emission and others. The fueling ratio introduced by Ehrenberg is adopted to analyse the wall pumping and the wall fuelling as the wall/limiter condition or the kinds of inlet gas are altered. The phenomena of particle release after different plasma discharges are also observed and compared by using the quadrupole mass-spectrometer.

PACC: 5240H; 5255